

신축공동주택 휘발성유기화합물(VOCs)로 인한 건강위해성평가

임영욱 · 양지연 · 김호현 · 이윤규¹⁾ · 김윤신²⁾ · 장성기³⁾ · 손종렬⁴⁾ · 노영만²⁾ · 신동천*

연세대학교 환경공해연구소, ¹⁾한국건설기술연구원 건축연구부

²⁾한양대학교 환경 및 산업의학연구소, ³⁾국립환경과학원 실내환경과, ⁴⁾고려대학교 보건과학대학
(2005년 7월 7일 접수; 2006년 9월 8일 채택)

Health risk assessment in terms of VOCs at newly-built apartment house

Young Wook Lim · Ji Yeon Yang · Ho Hyun Kim · Yun Gyu Lee¹⁾ · Yoon Shin Kim²⁾

Seong Ki Jang³⁾ · Jong Ryeul Sohn⁴⁾ · Young-Man Roh²⁾ · Dong-Chun Shin*

The Institute for Environmental Research, Yonsei University, Seoul, Korea

¹⁾*Korea Institute of construction technology, Building Research Department*

²⁾*Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University, Seoul, Korea*

³⁾*Korea National Institute of Environmental Research, Indoor environmental Division,*

⁴⁾*Dept. of Environmental Health, College of Health Sciences, Korea University*

(Received 7 July 2005; accepted 8 September 2006)

Abstract

For indoor air quality at a newly built apartment before move-in, we monitored formaldehyde and VOCs and assessed human exposure and probabilistic health risk. We selected 801 newly built apartments all over the country. The results of the research on the condition show the mean concentrations of formaldehyde 294 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 210(median) 1497 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (maximum), benzene 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (4 and 92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), toluene 1003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (773 and 5013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ethylbenzene 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (62 and 1192 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), xylene 287 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (138 and 2723 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and styrene 64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (42 and 531 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Formaldehyde from carcinogen and toluene and xylene from non-carcinogen were assessed the risk for human health. The excess cancer risk of formaldehyde for human beings between carcinogens is per 1.36 of average 1000 persons. This implies that it is over a level per 1.00 of 1000 persons demanding active risk reduction. Hence, we strongly need the active reduction plan and accurate source assumption. Among a variety of factors affecting indoor air quality for householders, closing construction or density of indoor air processing additional interior construction and indoor area, indoor air quality with a variety of districts show significant. The excess cancer risk for human beings of formaldehyde between carcinogens is per 1.36 of average 1000 persons. Non-carcinogen toxicity rate for human-beings with toluene and xylene among non-carcinogens is over HQ 1 from Seoul to local area.

keywords : Newly-built apartment house, Indoor air, VOCs, Health risk assessment

* Corresponding author. Tel : +82-2-2228-1896, E-mail : dshin5@yumc.yonsei.ac.kr

1. 서론

실내 오염이 인체에 미치는 영향은 실내에서의 일일 노출시간의 증가, 자연적 희석과정이 존재하는 대기오염과는 달리 한정된 공간에서의 오염된 공기의 지속적인 순환, 에너지 절감 시스템에 의한 건물의 밀폐화 추세에 따른 실내 오염농도의 누적 현상, 그리고 다양한 건축자재 및 생활가구의 사용으로 인한 실내 내부 오염원의 존재로 인해 실외 대기 오염으로 인한 인체 영향 못지않게 더욱 중요한 문제로 다루어지고 있다. 실내 공기 질 및 이로 인한 건강 영향에 관한 연구는 선진국에서 1970년대 이후 에너지 절감을 고려한 단열재와 같은 건축자재의 사용으로 인한 실내공간의 밀폐화와 경제수준의 향상으로 다양한 생활용품의 사용량이 증가되면서 예상치 않은 오염물질이 방출됨으로 인해 장기간 실내 거주자가 일명 ‘빌딩 증후군(Sick Building Syndrome, SBS)을 호소하게 됨으로서 사회적인 관심이 고조되어 SBS증상의 원인규명을 위해 시작되었다. 그 이후 적극적인 연구가 진행되면서 고층 빌딩 근무자들의 SBS증상 뿐만 아니라 일반 주택에서도 실내공기오염과 관련된 여러 가지 질병이 보고됨으로 인해 다양한 실내공간에서의 공기오염에 대한 중요성을 재인식하게 되었다. 실내공기 질(indoor air quality; 이하 IAQ)은 건강한 삶을 위해 중요한 부분이나, 실내공기 질을 관리하는 것은 매우 어려운 문제이다. 휘발성유기화합물류(volatile organic compounds, VOCs)가 증가되면 호흡기계에 유해한 영향을 미치는 등 건강문제와 관련이 있다고 보고된 바 있다(Wieslander et al., 1996; Diez et al., 2000; Rehwagen et al., 2001). 특히, VOCs는 건축 마감재를 통해 실내로 방출될 수 있어, 신축 건물에서의

이들 물질의 중요성을 강조하고 있다(Rehwagen et al., 2003). 더욱이, 최근 우리나라에서는 전국적인 주상복합아파트 및 유사 신축공동주택의 건축 호황이 일어나면서 농촌지역까지 아파트를 짓고 분양하고 있는 실정인바, 건축 자재에 함유된 유해물질로 인한 IAQ 문제가 심각하다. 따라서, 본 연구에서는 입주 전 신축공동주택에 대한 전국적인 실태조사 결과를 바탕으로 건강 위해성 평가를 실시하여, 포름알데히드 및 VOCs로 인한 인체 유해 영향을 예측하고자한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 조사 시기 및 측정대상 공동 주택의 선정

본 연구의 현장조사는 2005년 3월부터 8월에 걸쳐 전국규모로 실시되었으며 입주 전 신축 공동주택 801개 세대를 최종 조사하였다. “다중이용시설 등의 실내공기질관리법” 제 9조에 신축공동주택의 입주 전 실내공기 질을 측정하도록 하고 있으므로, 입주 직전 신축 공동 주택을 대상으로 선정하였다. 단지별로 6-18개 단위세대 내외의 측정세대를 선정하여 현장측정을 수행하였으며, 서울 및 수도권 411개 세대, 영남권 219개 세대, 호남권 81개 세대, 마지막으로 충청권 90 세대를 최종 조사하였다. 시공사에 대한 고려를 위해 대규모 건설회사와 중소규모 회사로 구분하여 대상 측정단지 수를 고려하였다. 대상 시공사는 약 40개 내외로 선정하였다. 실내에 영향을 미치는 변수인 지역, 계절조건, 시공사, 평형, 층수, 보양지 제거여부, 청소실시 여부, 난방실시 여부, 베란다확장공사 여부, 주요 내장재의 종류 및 마감재 현황, 일기상황, 측정당시의 온도도 조건, 측정세대의 도심지역, 시골지역, 공단지역 등 외부조건 등

실내공기에 영향을 미칠 수 있는 영향도 함께 조사하였다.

2.2 평가 대상 물질

“다중이용시설 등의 실내공기질관리법” 상의 시행규칙에서 제시하고 있는 포름알데히드와 6개의 주요 VOCs, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 1, 4-디클로로벤젠, 스티렌을 주요 대상물질로 하고, 아세트알데히드 및 기타 주요 선진국에서 가이드라인으로 설정하고 있는 개별 VOCs에 대한 측정 및 분석을 수행하였다.

2.3 측정 및 분석 방법

2.3.1 샘플링 및 분석방법

실내공기 중 알데히드류 및 VOCs의 측정 및 분석방법은 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”에서 규정하고 있는 실내공기질 공정시험방법에 준하여 측정 및 분석하였다. 측정은 시작 전에 외부에 면한 모든 개구부와 실내출입문, 수납가구의 문등을 개방하고, 이 상태를 30분 이상 지속하여 환기시킨 후 외부공기와 면하는 개구를 5시간이상 모두 닫아 실내외 공기의 이동을 방지하였고, 실내간의 이동을 위한 문과 수납가구 등의 문은 개방하여 실시하였다. 시료 채취는 원칙적으로 30분간 2회 실시하였고, 실내에 자연환기구 및 기계 환기시스템이 설치되어 있는 경우, 이를 밀폐하거나 가동을 중단하고 측정을

실시하는 것을 원칙으로 하였다. 포름알데히드의 경우 오존스크러버 및 DNPH카트리지를 사용하였고, VOCs의 경우 Tenax-TA 고체 흡착관을 공통적으로 사용하였다.

VOCs는 흡착제를 충전한 흡착관에 시료를 채취하여 고체 열탈착 장치에 의해 1차 고온탈착시키고, 다시 저온농축관에서 농축시킨 후, GC내 컬럼에 도입하여 GC/MS로 분석하였고, 알데히드류는 DNPH-Slicacartridge 내 코팅된 DNPH(2, 4-dinitrophenylhydrazine)에 흡착된 것을 유도체화하여 HPLC로 분석하였으며, 본 연구에 참여한 기관들은 동일한 분석방법으로 진행하였다.

2.3.2 분석의 정확도

본 연구는 전국 규모의 조사이기 때문에 측정 및 분석의 효율을 고려하여 전국 5개 기관(한국건설기술연구원 등)에서 각각 샘플링(5개 기관) 및 분석(4개 기관)을 담당하였다. 그러나, 동일 기관이 아닌 여러 기관에서의 측정 및 분석결과에 대한 정도관리를 위해 공기채취 펌프의 보정, VOCs 흡착관 및 DNPH 카트리지의 청정도 평가, VOCs 흡착관 이력관리 및 RRT(Round Robin Test), 즉 임의의 농도의 측정시료의 상호비교시험을 하였다.

재현성평가는 동일한 농도의 표준물질을 7회 반복 실험을 통해 이루어졌으며 상대표준편차(RSD%)로 재현성을 평가하였고, RSD값이 20%이하였다. 기관별로 물질별 검량선을 작성한 결과 모든 물질의 결

Table 1. Condition of sampling.

	Aldehyde	VOCs
Type	DNPH-Slica	Tenax-TA(60/80mesh)200mg
Volume	0.5 ℓ/min	0.1 ℓ/min
Sampling Vol.	15 ℓ	3 ℓ

정계수(r^2)는 0.997이상이었다. 총 2회에 걸쳐 상호비교시험을 실시하였으며, 각 측정기관별 TVOC의 농도의 범위의 상대표준편차(RSD)가 10%정도로 나타났다.

2.4 변수에 따른 평가 그룹 분류

연구 대상 가구의 실내공기에 영향을 주는 다양한 인자들 중에서 지역(서울, 지방), 마감공사 또는 추가적인 인테리어 공사가 진행 여부에 따른 실내 공기 중 농도와 실내 면적 즉, 평수에 따른 실내공기질이 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있었다($p<0.05$). 이에 본 연구에서는 서울지역의 신축공동주택과 비교하여 지방에 위치한 신축공동주택에서 통계적으로 유의하게 포름알데히드 및 일부 개별 VOCs에서 농도가 높게 조사되었으며, 마감 공사 중이거나 추가적으로 실내 인테리어 공사를 수행하거나 하고 있는 가구의 실내 공기 중 포름알데히드 및 일부 개별 VOCs는 다른 가구에 비해 통계적으로 유의하게 높은 농도를 나타내었다. 또한 실내 평수가 넓을수록 실내 포름알데히드 및 일부 VOCs 농도도 증가되었으며, 특히 30평 이상의 가구는 그보다 작은 실내 평수에 비해 통계적으로 유의하게 높게 검출되었다. 본 연구는 신축공동주택의 시공이 완료되고, 추가적인 오염원의 유입이 없는 상태에서의 실내에 발생하는 유해물질로 인한 인체 위해 영향을 예측하는

것으로, 시공이 완료되지 않은 상태에서 측정되었거나, 추가적인 인테리어 시공이 실시된 가구에서의 측정 가구는 평가 대상 가구에서 제외하였다. 공사 중에 측정이 실시된 68가구를 제외한 733가구는 실내 오염도에 영향을 미치는 평수를 30평 이하 및 이상으로 구분하여 두 그룹에 대한 건강위해성 평가를 실시하였다.

2.5 연구대상물질의 평가 분류

평가대상물질은 US EPA 물질분류 범주에 따라 포름알데히드(B1:probable human carcinogen), 아세트알데히드(B2:probable human carcinogen) 및 벤젠(A:human carcinogen)은 발암물질로 분류하여 평가하며, 톨루엔(D:not classifiable as to human carcinogen) 등 기타물질은 비발암물질로 분류하여 평가한다.

2.6 인체노출량 평가 및 불확실성 분석

임의의 농도로 오염된 신축공동주택에 평생 노출되며 생활할 경우의 인체 노출량은 오염농도, 일일 호흡률, 체중, 노출빈도, 노출기간, 기대수명 등을 고려하여 산출할 수 있다. 본 노출평가에서 노출인자들의 값은 가능한 한 합리적인 최대노출(RME : Reasonable Maximum Exposure)에 상응하는 값을 사용하고자 하였고, RME는 타당하게 발생할 수 있는 최대노출을 뜻한다. 노출농도

Table 2. Criteria of targeting group for health risk assessment.

Group	A	B	Criteria
1	129	84	no closing work or density of indoor air processing additional interior construction and under 30 area
2	277	260	no closing work or density of indoor air processing additional interior construction and above 30 area

A : Seoul and national capital region, B: Yeong-nam, Ho-nam and Chung-chung

(concentration)는 일정한 노출기간 동안의 산술평균치를 사용하며, Crystal Ball 프로그램을 이용하여 실측된 자료의 특성을 가장 잘 반영하는 확률분포를 선정·적용하였다.

체중(body weight)의 경우 평생노출을 고려할 때 모든 연령그룹에 대한 시간가중평균치를 취해야 한다. 그러나 미국 환경보호청에서는 체중에 대한 접촉율 비(ratio)가 평생 일정한 경우에는 성인 남녀의 평균 체중을 고려한 대표값(70kg)을 적용하도록 권고하고 있다. 이에 본 연구에서도 한국 성인 남녀 평균체중 62.8kg(기술표준원, 2004)의 평균값을 고려하여 60kg을 적용하였다. 호흡율(Inhalation rate)의 경우 US EPA(1985)에서 보고된 바 있으며, 이 보고서에서는 단지, 특별한 활동패턴이 알려지지 않았을 때 지속적인 노출 상황의 평가에 기준이 되는 성인의 평균 일일 호흡률의 90th percentile 값인 20m³/day을 제안하고 있고, 최악(worst case)의 호흡률 계산을 위해서는 20m³/day의 1.5배인 30m³/day를 쓰도록 언급하고 있으나 우리나라의 경우에는 성인의 일일 호흡률에 관한 검증된 자료가 없다. 따라서, 본 평가에서는 위 자료를 참고하여 높은 호흡율로 인한 over-estimation을 피하기 위해 US EPA의 NCEA(National Center For Environmental Assessment)의 Exposure Factors Handbook I(1997)의 자료 중 호흡율에 대한 권고치를 참고하여 19-65세의 성인의 평균 호흡율 자료 즉, 성인 여성 11.3m³/day, 성인 남성 15.2m³/day의 평균값인 13.3m³/day을 사용하였다. 노출기간(exposure duration)과 노출빈도(exposure frequency)의 설정은 총 노출시간을 계산하기 위하여 쓰여지는데 이 변수 또한 통계수치가 유용하면, 노출시간에 대한 95th percentile 값을 사용하지만, 그렇지

않을 경우에는 보수적으로 타당한(reasonable conservative)측정치를 사용한다. 본 연구에서는 US EPA에서 사용하고 있는 기대수명 및 통계청(2001)한국인의 평균 수명 70년을 사용하고, 365일/년 최대치로 노출되는 것으로 가정하였다. 추가적으로 비발암물질에 대한 장기적인 노출을 평가할 때 노출은 노출기간(만성일일노출량)에 대한 평균노출을 사용하여 계산하고, 발암물질의 경우는 평생(평생평균 일일노출량)에 대한 총 누적용량의 할당에 의해 계산한다. 이러한 이유로 위해성평가 기법에서는 비발암물질의 경우 평균시간(Average Time)을 노출기간과 동일하게 적용하고, 발암물질의 경우 기대수명을 70년을 적용하고 있다. 신축공동주택 내 발암 및 비발암 물질의 실내 오염으로 인한 인체 노출량 산출은 동일한 수식 및 노출 변수를 이용하였다(표 3). 인체 노출량 예측시 발생하는 불확실성을 최소화하기 위해 인체 노출량을 산출하는 수식에 적용된 모든 인자들의 확률분포 모형을 결정하여 Monte-Carlo simulation 법에 의한 불확실성 분석을 병행하였다(그림 1).

$$LADD(\text{mg/kg/day}) = \frac{C_{IA} \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$C_{IA}(\text{mg/m}^3)$: Concentration

$IR(\text{m}^3/\text{day})$: Inhalation rate

$ET(\text{unitless})$: Exposure Time

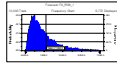



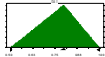
$EF(\text{days/yr})$: Exposure frequency in days per year

$ED(\text{years})$: Exposure Duration in years

$BW(\text{kg})$: Body weight

$AT(\text{days})$: Average Time in days

Table 3. The value and distribution of the exposure parameter.

Parameter	Value	Distribution type		Reference
Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	Customer		-
Weight (kg)	60	Log-normal	 체중 (kg)	Korea Research Institute of Standard and Science, 1998
Inhalation Rate (m^3/day)	13.3	Uniform	point value	US EPA, 1997
Exposure Duration (year/lifetime)	70	Normal	 ED(yr/lif)	Korea National Statistical Office, 2001
Exposure Frequency (day/year)	365	Triangular	 EF(d/yr)	US EPA, 1995
Indoor Duration (unitless)	0.8	Triangular		IERY, 2001

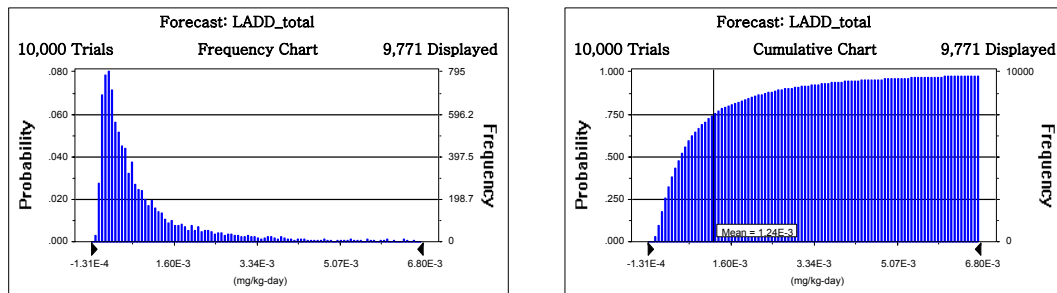


Fig 1. Expectation of human exposure by uncertainty analysis

2.7 물질별 용량-반응평가 자료 결정

발암력, q_1^* 은 용량-반응 곡선에서 선형계수의 95% 상한값에 해당하는 것으로서, 포름알데히드의 경우에는 Kerns 등(1983) 연구의 용량-반응 자료를 바탕으로 선형화 다단계 모델(Linearized multistage model)에 의해 $4.6 \times 10^{-2} (\text{mg/kg/day})^{-1}$ 으로 산출되었다. 아세트알데히드 및 벤젠에 대한 정보는 표 4에 제시하였다. 단위 위해도는 건강한 성

인이 임의의 오염물질이 단위 농도($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 오염된 공기에 평생동안 노출되어 생활할 때 이로 인해 발생할 수 있는 초과 발암 확률로써, 발암성 용량-반응 평가를 통해 얻어진 발암력($(\text{mg/kg/day})^{-1}$)과 성인 평균 체중 및 일일 호흡률을 고려하여 산출된다.

톨루엔의 동물 실험결과, 가장 낮은 독성 영향 농도가 관찰된 Foo 등(1990)의 연구 결과를 이용

Table 4. Determination of carcinogenic potency and unit risk.

Materials	Dose-response model	Slop factor ($(\text{mg/kg/day})^{-1}$)	Unit risk ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$)
Formaldehyde	Linearized multistage model	4.60×10^{-2}	1.30×10^{-5}
Acetaldehyde	Linearized multistage model	7.70×10^{-3}	2.20×10^{-6}
Benzene	Linearized multistage model	3.60×10^{-2}	6.00×10^{-6}

하여 호흡 노출로 인한 참고치(RfC)를 결정하였다. 최저관찰영향수준(LOAEL)은 Foo(1990)에 의한 연구 결과를 이용, 이를 가지고 호흡 노출로 인한 참고치(RfC)를 결정하였다. 에틸벤젠 등 기타 물질에 대한 정보는 표 5에 제시하였다.

2.8 실내공기노출을 통한 발암 및 비발암 위험도 추정

위해도 추정단계는 위해성 평가단계에서 용량-반응평가와 노출평가에서 산출된 결과를 조합하는 과정으로 실제 오염물질의 노출에 따른 초과발암위해도를 산정하는 과정이다. 용량-반응평가를 통해 각 수학적 모델에서 산출된 단위위해도 추계치 중 가장 보수적인(conservative: 동일용량에서 더 높은 위해도를 나타내는 또는 동일 위해도에서 더 낮은 농도를 추정하는) 모델에서 산출된 값을 이용하여 현 노출 수준에서의 초과발암위해도를 산정하는 것이 일반적이다. 초과발암(excess cancer risk) 및 비발암 위해도, 즉 위험값(HQ) 계산식은 다음과 같다.

Excess cancer risk

$$= \text{Concentration}(\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Unit risk}((\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1})$$

$$= \text{LADD}(\text{mg}/\text{kg}/\text{day}) \times \text{Slop factor}((\text{mg}/\text{kg}/\text{day})^{-1})$$

$$\text{HQ} = \frac{\text{LADD}(\text{mg}/\text{kg}/\text{day})}{\text{RfC}(\text{mg}/\text{m}^3) \times \text{IR}(\text{m}^3/\text{day})/\text{BW}(\text{kg})}$$

3. 결 과

3.1 측정결과

전국의 신축공동주택의 조사대상 VOCs의 농도를 서울/수도권과 지방권(영남, 호남, 충청)으로 크게 분류하였다. 알데히드류를 먼저 살펴보면 포름알데히드의 경우 지방($360.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 서울/수도권($233.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 높게 검출되었다. 아세트알데히드의 경우에도 지방($62.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 서울/수도권($37.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 높게 조사되었다. 벤젠의 경우 평균농도가 서울/수도권($9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 지방($6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 다소 높게 측정되었으나, 최대값은 서울/수도권 지역에서 2372.7

Table 5. Determination of reference concentration.

Materials	Toxic(mg/m^3)	RfC(mg/m^3)
Toluene	LOAE(HEC)L = 119	0.4
Ethylbenzene	NOAEL = 434	1
Xylene	NOAEL = 39	0.1
Styrene	NOAEL(HEC) = 39	0.1

Table 6. Distribution of VOCs Concentration at sites.

Material	Site	Detection rate(%)	Mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Median ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	S.D ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Formaldehyde	A	100.0	233.1	166.0	1335.5	13.0	196.6
	B	100.0	360.9	281.9	1497.2	37.0	262.3
Acetaldehyde	A	100.0	37.9	29.4	133.7	5.0	26.0
	B	100.0	62.2	41.9	594.5	0.0	79.1
Benzene	A	98.2	9.8	3.0	2372.7	0.0	121.3
	B	100.0	6.7	5.1	91.9	1.2	6.5
Toluene	A	99.7	928.4	658.2	5013.7	0.0	816.7
	B	100.0	1084.4	1012.2	4238.1	58.2	649.8
Ethylbenzene	A	100.0	129.8	63.1	783.6	2.1	131.7
	B	100.0	108.9	61.7	1192.2	4.5	127.1
Xylene	A	100.0	269.3	141.7	1808.9	5.8	345.4
	B	100.0	306.9	134.3	2722.5	10.7	379.9
Styrene	A	100.0	64.2	44.7	459.3	0.0	70.4
	B	100.0	62.1	39.9	531.4	0.0	72.4
1,4-dichlorobenzene	A	0.3	11.0	11.0	11.0	11.0	-
	B	4.9	5.6	5.6	7.7	4.7	0.7

A : Seoul and national capital region, B: Yeong-nam, Ho-nam and Chung-chung

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 톨루엔의 경우 개별 물질 중 가장 많은 양이 검출되었으며, 서울/수도권($928.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 지방($1084.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 유사하게 검출되었다. 에틸벤젠의 경우 서울/수도권($129.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 지방($108.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해, 자일렌은 반대로 지방($306.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 서울/수도권($269.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 다소 많은 양이 검출되었다. 스티렌과 1,4-디클로로벤젠은 지역에 상관없이 유사한 농도로 조사되었다.

3.2 건강 위해성평가

3.2.1 발암성 물질의 평가

신축 공동 주택의 실내공기 중 포름알데히드 오염 농도로 평생 노출될 경우 호흡기를 통해 인체로 유입될 수 있는 양은 일일 평균 성인 체중 1kg 당 서울/수도권 $2.95\text{mg}(10^{-2}\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day})$, 지방 4.01mg

($10^{-2}\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day}$) 수준으로 평가되었다. 이로 인한 포름알데히드의 평생 초과발암해도는 서울/수도권의 경우 평균 인구 천명당 $1.36\text{명}(1.36\times 10^{-3})$, 지방의 경우도 평균 인구 천명당 $1.85\text{명}(1.85\times 10^{-3})$ 의 높은 인체 위해도를 보였다. 서울/수도권과 지방권의 30평 미만의 신축 가구 중 실내 포름알데히드 농도로 인한 인체 초과 발암 위험도는 서울/수도권과 지방 모두 99.8%가 만명당 $1\text{명}(1\times 10^{-4})$ 이상으로 산출되었고, 적극적인 저감 조치를 취해야 하는 천명당 $1\text{명}(1\times 10^{-3})$ 이상은 서울/수도권 50.4%, 지방 49.2%였다. 서울/수도권과 지방의 30평 이상의 신축 공동 주택에서도 이와 유사하게 서울 99.8%가 만명당 $1\text{명}(1\times 10^{-4})$ 이상으로 산출되었으며, 지방에서는 100%가 만명당 $1\text{명}(1\times 10^{-4})$ 이상으로 산출되었다. 적극적인 저감 조치를 취해야 하는 천명당 $1\text{명}(1\times 10^{-3})$ 이상은 서울/수도권

48.3%, 지방 78.4%로 나타나 지방의 신축아파트에서 높은 위해도 비율을 나타냈다. 아세트알데히드 및 벤젠은 건강위해 관리기준으로 제안하고 있는 만명당 1명(1×10^{-4}) 이상은 관찰되지 않았다.

3.2.2 비발암성 물질의 평가

신축 공동 주택의 실내공기 중 톨루엔 오염 농도로 평생 노출될 경우 호흡기를 통해 인체로 유입될 수 있는 양은 일일 평균 성인 체중 1kg당 서울/수도권 $1.10\text{mg}(10^{-1}\text{mg/kg-day})$, 지방 $1.35\text{mg}(10^{-1}\text{mg/kg-day})$ 수준으로 평가되었다. 이로 인한 톨루엔의 독성위험값(HQ)은 서울/수도권의 경우 평균 0.83, 지방은 평균 1.01로 산출되어, 현재의 오염수준이 허용 가능한 수준(위험값 1)을 초과하여 유해영향이 발생할 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 30평 미만의 신축 주택의 실내 톨루엔 오염으로 인한 독성위험값의 50th%값은 서울/수도권 0.54, 지방 0.82이며, 30평 이상의 신축 주택에서는 서울/수도권 0.64, 지방 0.84로 산출되었으며, 95th%값은 30평 미만의 신축 주택에서는 서울/수도권 1.74, 지방 2.24이며, 30평 이상에서는 서울/수도권 2.78, 지방 2.48로 산출되었다. 실내 공간 규모가

큰 가구에서 다소 높은 독성위험값을 보였으나, 통계적인 유의성은 관찰되지 않았다. 서울/수도권과 지방의 신축공동주택 중 톨루엔 오염으로 인한 독성위험값이 1을 초과하는 비율은 30평 미만의 가구에서는 서울/수도권 19.4%, 지방 37.7%, 30평 이상 가구에서는 서울/수도권 31.4%, 지방 41.0%로 나타나, 이에 대한 관리가 시급한 것으로 평가되었다.

신축 공동 주택의 실내공기 중 자일렌 오염 농도로 평생 노출될 경우 호흡기를 통해 인체로 유입될 수 있는 양은 일일 평균 성인 체중 1kg당 서울/수도권 $3.54\text{mg}(10^{-2}\text{mg/kg-day})$, 지방 $3.70\text{mg}(10^{-2}\text{mg/kg-day})$ 수준으로 평가되었다. 이로 인한 자일렌의 독성위험값(HQ)은 서울/수도권의 경우 평균 1.06, 지방의 경우 평균 1.11로 산출되어, 현재의 오염수준이 허용 가능한 수준(위험값 1)을 초과하여 유해영향이 발생할 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 30평 미만의 신축 주택에서의 자일렌으로 인한 독성위험값의 50th%값은 서울/수도권 0.84, 지방 0.60이며, 30평 이상의 신축 주택에서는 서울/수도권 0.42, 지방 0.66으로 산출되었으며, 95th%값은 30평 미만의 신축 주택에서는 서울/수도권

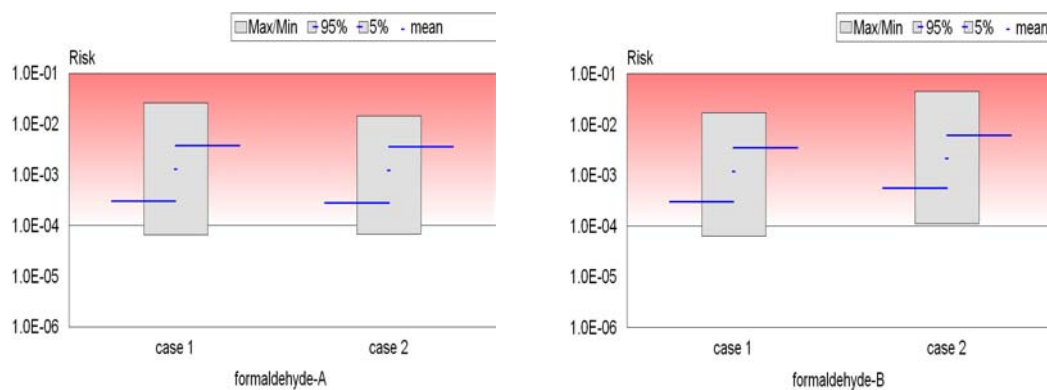


Fig 2. Risk distribution of formaldehyde

2.99, 지방 27.13이며, 30평 이상에서는 서울/수도권 3.70, 지방 17.97로 산출되었다. 서울/수도권과 지방의 신축공동주택 중 자이렌 오염으로 인한 독성위험값이 1을 초과하는 비율은 30평 미만의 가구에서는 서울/수도권 40.3%, 지방 31.2%로 나타났으며, 30평 이상 가구에서는 서울/수도권 24.7%, 지방 38.0%이었으며, 5를 초과하는 가구(서울/수도권 3.3%, 지방 3.4%)도 관찰되어 이에 대한 관리가 필요한 것으로 평가되었다. 에틸벤젠, 스티렌은 최대 독성값은 1을 초과하는 경우도 있었으나, 평균농도로 산출시 안전역에 해당되었다. 1, 4-디클로로벤젠은 불검출율이 높아 이로 인한 인체

노출량 및 위해 수준을 평가할 수 없었다.

4. 고 찰

본 연구에서는 전국 신축 공동주택 800여개 단위세대의 실내공기 중 포름알데히드, 아세트알데히드, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자이렌, 스티렌, 파라디클로로벤젠을 실측 조사한 결과를 바탕으로 연구대상물질을 발암물질과 비발암물질로 구분하여 물질별 건강 위해성평가를 실시하였다. 지역별 신축공동주택 입주 전 실내공기오염물질의 농도

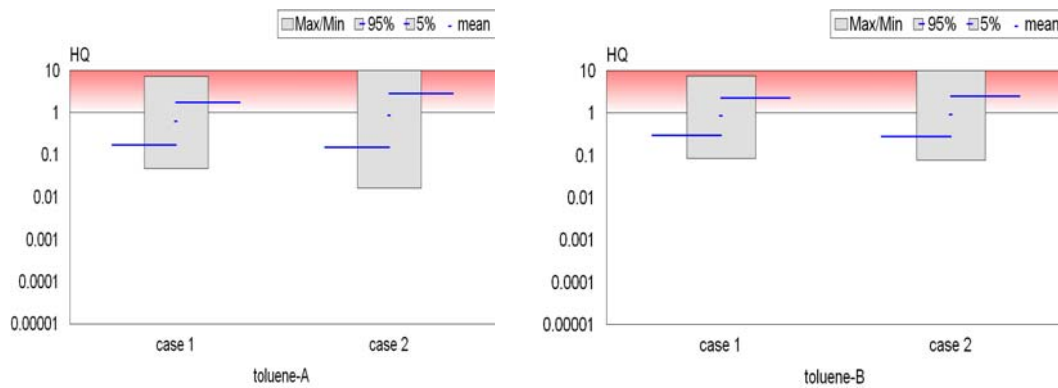


Fig 3. Risk distribution of Toluene

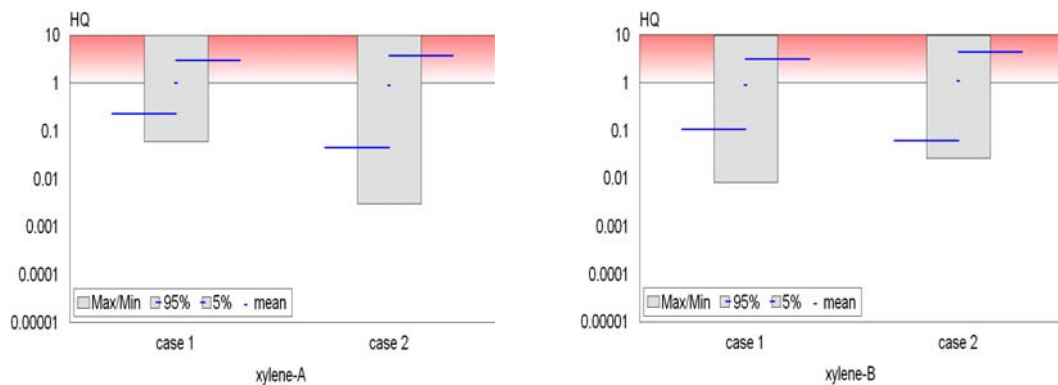


Fig 4. Risk distribution of Xylene

를 바탕으로 연구 대상 가구의 실내공기에 영향을 주는 다양한 인자들 중 마감공사 또는 추가적인 인테리어 공사가 진행 여부에 따른 실내 공기 중 농도와 실내 평수 및 지역(서울과 지방)에 따른 실내 공기질이 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있었다. 실내 평수가 넓을수록 실내 오염물질의 농도도 증가되었으며, 특히 30평 이상의 가구는 그보다 작은 실내 평수에 비해 통계적으로 유의하게 높은 실내 농도를 보이고 있었다($p<0.05$). 건물의 형태나 종류를 불문하고 신축 또는 재건축한 상가 건물 또한 포름알데히드 방출의 중요한 원인이 될 수 있다. MDF, 톱밥 합성판, 활엽수 합판의 자재로 만들어진 마루바닥, 벽널판, 가구, 주름 방지제, 방수제로 처리한 직물이나 섬유는 포름알데히드의 잠재적 배출원이 될 수 있으며, 미국 환경보호청(US EPA)이 소비자들을 대상으로 한 조사에서는 VOCs에 대한 노출이 흔하고 변수가 상당히 많은 것으로 나타났으며 보통 낡은 건물보다는 신축했거나 재건축 건물에서 VOCs의 수치가 높은 것으로 나타났다. 또한 건물에서 방출되는 VOCs가 가장 문제가 되고 다음으로는 소비제품에서의 VOCs 방출이 문제가 되었다(US EPA, 1987). M. Rehwagen 등(2003)의 거주중인 아파트에서의 계절별 연구에 의하면 VOCs의 실내농도가 타 계절에 비해 겨울에 3배가량 높게 조사되었고, 본 연구는 계절에 관계없이 입주 전 신축 공동주택을 대상으로 한 전국적인 조사였으므로 측정 조건, 특히 계절에 따른 온습도의 영향이 있을 수 있으므로 측정시 온습도 조건을 함께 조사하였으나 일관성 있는 결과는 나타나지 않았다. 건강위해성평가를 위한 분류시 지역에 따른 유의한 농도 차이를 나타냈는데 조사 대상물질 중 포름알데히드, 톨루엔 등에서 서울/수도권지역 신축공동주택

에 비해 지방에 위치한 신축공동주택에서 통계적으로 유의하게 높게 나타났고(각 $p<0.01$, $p<0.05$), 앞으로의 신축아파트 연구조사시 추가적으로 고려해야 할 부분이다. 실측자료를 바탕으로 한 위해성평가 시 실내공기 질 거주자의 거주기간 동안 같은 농도로 늘 노출되는 것은 아니다. 그러나 평생 동안의 노출농도를 모니터링 할 수는 없으므로 위해성평가 방법론에서는 노출에 대한 가정, 즉 평균농도로 평생 동안 노출된다는 것을 가정하는 것이며, 실측자료가 많은 평균값일수록 그 가정에 대한 신뢰도는 높아진다고 할 수 있다. 현대인들의 일일 실내 거주 시간은 평균 19시간 정도로 실내 점유율이 80% 수준으로 평가되고 있으며, 사회와 문명이 발달할수록 실내 거주율이 증가되는 추세를 감안한다면, 신축 공동 주택에서의 포름알데히드, 톨루엔 및 자이렌과 같은 인체 발암성 또는 독성물질에 대한 명확한 실내 발생원 평가 및 위해 저감 방안에 대한 적극적인 연구가 필요한 것으로 평가되었다. 본 연구에서 실시한 신축 공동 주택의 실내 공기 오염으로 인한 건강 위해성 평가는 시공 완료 직후 단기 측정에 의한 실내 오염도 자료를 이용하여, 같은 조건으로 평생(70년) 동안 노출될 경우를 가정하여(worst condition) 인체 위해 수준을 평가함으로써 이에 따른 불확실성이 존재할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 전국 신축 공동주택 800여개 단위세대의 실내공기중 포름알데히드, 아세트알데히드, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자이렌, 스티렌, 파라디클로로벤젠을 실측 조사한 결과를 바탕으로

연구대상물질을 발암물질과 비발암물질로 구분하여 물질별 건강 위해성평가를 실시하였다. 연구대상 가구의 실내공기에 영향을 주는 다양한 인자들 중 마감공사 또는 추가적인 인테리어 공사가 진행 여부에 따른 실내 공기 중 농도와 실내 평수 및 지역(서울/수도권과 지방)에 따른 실내 공기질이 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있었다($p<0.05$). 공사 중에 측정이 실시된 68가구를 제외한 733가구는 실내 오염도에 영향을 미치는 평수를 30평 이하 및 이상으로 구분하여 두 그룹에 대한 인체 위해성 평가를 실시하였다.

첫째, 발암성 물질 중에는 포름알데히드로 인한 인체 초과발암위해도는 평균 천명당 1.36명(1.36×10^{-3})으로서 총 인체 초과발암위해도에 99%를 기여하고 있으며, 적극적인 위해 저감 관리가 요구되는 천명당 1명 수준을 초과하고 있어, 이에 대한 명확한 발생원 추정 및 적극적인 저감 방안이 필요한 것으로 나타났다.

둘째, 비발암 독성 물질 중에는 톨루엔과 자이렌으로 인한 인체 위해 가능성이 가장 큰 물질로 분석되었다. 톨루엔과 자이렌으로 인한 인체 비발암독성위험값도 서울/수도권과 지방 모두 HQ 1을 초과하고 있어 실내 발생원 및 저감 방안이 필요한 물질로 평가되었다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원 실내환경사업단 사업인 “신축공동주택 실내공기 질 권고기준 설정 연구(Ⅱ)”에 의해 수행한 연구결과의 일부이며, 이에 대해 수고해주신 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 환경부(2001), 실내공기오염물질의 위해성 평가 지침서.
- Diez, U., Kroebner, T., Rehwagen, M., Richter, M., Wetzig, H., Schulz, R., Borte, M., Metzner, G., Krumbiegel, P. and Herbarth, O. (2000) Effects of indoor painting and smoking on airway symptoms in atopy risk children in the first year of life . results of the LARS-study. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 203, 23.28.
- Foo SC, Jeyaratnam J. and Koh D. Chronic neurobehavioral effects of toluene. *Br J Ind Med* 1990; 47(7): 480-484.
- Kerns WD, Pavkov KL and Donofrio DJ et al. Carcinogenicity of formaldehyde in rats and mice after long-term inhalation exposure, *Cancer Res.* 1983; 43: 4382-4392.
- M. Rehwagen, U. Schlink, O. Herbarth. Seasonal cycle of VOCs in apartments. *Indoor air.* 2003;13:283-291.
- M. Rehwagen, M., Krumbiegel, P., Koschny, I., Rolle-Kampczyk, U. and Herbarth, O. (2001) The [15N]methacetin liver function test characterizes multicomponent exposure of children in industrially polluted regions. *Isot. Environ. Health Stud.*, 37, 167.174.
- US EPA. Assessment of Health Risk to Garment Workers and Certain Home Residents from Exposure to Formaldehyde. Office of Toxic Substances, Washington, DC, 1987.
- US EPA. NCEA(National Center For Environmental Assessment), Exposure Factors Handbook I (1997).

- Wieslander, G., Norback, G., Björnsson, E., Janson, C. and Boman, G. (1996) Asthma and the indoor environment: the significance of emission of formaldehyde and volatile organic compounds from newly painted surfaces. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 69, 115.124.